

公益財団法人 光科学技術振興財団
委託研究報告書（令和 6 年度）

レーザー科学技術の将来に関する調査研究
－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と将来
に関する調査－ 3. 付加プロセス

令和 7 年（2025 年）3 月
光産業創成大学院大学

目次

第1章 序論	1 頁
第2章 質量の増加を伴う表面処理プロセスの概要	3 頁
2.1 材料付加方法	
2.2 レーザークラッディングとレーザーアロイングの特徴	
参考文献	
第3章 機能付与を目的とした表面処理技術	5 頁
3.1 プラント機器	
3.2 輸送機器	
3.3 電気接点	
3.4 軸受け軌道面	
3.5 連続鑄造用鑄型	
3.6 装飾的応用	
3.7 硬質粒子分散レーザークラッディングによる部品補強・長寿命化	
参考文献	
第4章 構造形成を目的とした表面処理技術	9 頁
4.1 金属部品補修	
4.2 付加製造	
参考文献	
第5章 質量増加（物質付加）を伴う表面処理のための機器・処理方法	12 頁
5.1 機器	
5.2 付加材料とその供給方法	
5.3 プロセス制御	
参考文献	
第6章 結言	19 頁

第1章 序論

本報告書では、令和4年度に着手したレーザー科学技術の将来に関する調査研究－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と将来に関する調査－の3年目にあたる、令和6年度の調査結果を報告する。

「表面処理」技術は、レーザー加工分野において、一般的に「表面改質」と呼称・分類されている。レーザーによる表面改質技術の分類については、令和4年度の報告書の中で、レーザーによる表面処理技術を俯瞰的に捉えるために言及しているが、本報告書においても表1-1に再掲して示す。

表1-1 レーザー表面改質の分類

プロセス	名称		主たる処理目的
非溶融	変態焼入れ		表面硬化
	結晶粒微細化		表面硬化、強度特性改善等
	溶体化処理		耐食性改善
	アニーリング		残留応力・歪み低減、結晶成長
	衝撃硬化(ピーニング)		疲労強度改善、耐SCC
	磁区細分化		電磁鋼板鉄損改善
	フォーミング		歪付与、曲げ加工
溶融	通常凝固	再溶融(偏析解消)	耐食性改善
		コンソリデーション	気孔率低減、均質化
		溶接止端部処理	疲労強度改善
		粗面化	異材接合前処理、ロール機能化
	急速凝固	チル化	耐摩耗性・耐孔食性改善
	超急速凝固	グレージング	非晶質化、耐食性改善
	合金元素添加	アロイング	耐摩耗性・耐食性等改善
素材被覆	肉盛り(クラッディング)		欠損部補修、耐摩耗性・耐食性改善
	直接描画		回路形成
除去	クリーニング		除染、除錆
	ストリッピング		被膜剥離
	ホーニング		潤滑特性付与
	マイクロテクスチャリング		耐摩耗性改善、濡れ性等制御

レーザーによる表面処理の目的は、耐疲労特性・耐摩耗性・耐食性・意匠性・濡れ性・電磁気特性・その他機能付与等と多岐に亘り、加工原理も熱的(溶融・非溶融)・非熱的なものに分類でき、付加・変形・除去全ての加工方法にまたがっている。同種材料・同目的でも、異なる表面改質技術・原理を応用するケースが多く提案・実用化されていることが判明した。このため、令和4年度報告書では、材料溶融・質量変化を伴わない熱的プロセス(表1-1で「非溶融」と標記分類さ

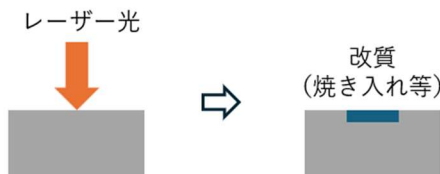
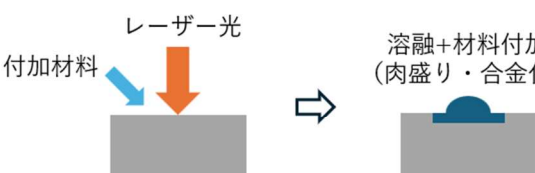
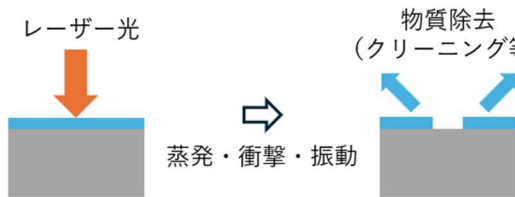
れた技術領域)に焦点を絞り、夫々の技術の概要と技術開発・実用化に向けた取組みの調査結果を報告した。

表面処理技術調査2年目となる令和5年度は、質量の減少(物質除去)を伴うプロセスに関する調査を実施することとした(表1-1で「除去」と標記分類された技術領域)。質量の減少(除去)を伴う表面処理技術だけでも、非常に多岐に亘っているため、近年、社会的に関心の高まっているレーザークリーニング技術に焦点を絞った調査結果を報告した。

表面処理技術調査3年目となる令和6年度は、質量の増加(物質添加)を伴うプロセスに関する調査を実施することとした。表1-1で「素材被覆」と標記分類された技術領域および「溶融」中の「合金元素添加(アロイング)」が該当する。なお、同じく物質の付加を伴うレーザーを用いた3次元造形(AM)技術については、令和2年度(金属材料によるAM技術)と令和3年度(非金属材料によるAM技術)に実施した調査研究で取り上げている。

本調査研究における令和6年度調査の位置付けを、上記の各処理の概要とともに、表1-2に示す。

表1-2 本調査研究で取り上げる表面処理技術の概要

プロセス		処理概要	調査年度
熱処理	非溶融	レーザー光 	令和4年度
	溶融	レーザー光 	令和7年度予定
		付加材料 レーザー光 	令和6年度
物質除去		レーザー光 蒸発・衝撃・振動 	令和5年度

第2章 質量の増加を伴う表面処理プロセスの概要

2.1 材料付加方法¹⁾

クラディングおよびアロイングが質量増加（材料付加）を伴う代表的な表面処理プロセスであり、基板（母材）表面上への付加材料供給とレーザー照射が行われる。付加材料の供給方法により、2ステッププロセスと1ステッププロセスに分類される。

2.1.1 2ステッププロセス

レーザー照射処理に先立ち、付加材料を基板表面上に前置するプロセスである。粉末状やワイヤー状の付加材料を供給する機材を必要としないため、主に加工実験や試作等で用いられる方法である。

このプロセスにはいくつかの問題が伴う。基板上に事前配置された粉末粒子は、基板との十分な結合だけでなく、互いに十分な凝集力も持たなければならない。レーザー照射プロセス中の不活性ガス流によって前置された粉末粒子の飛散防止のため、化学結合剤が利用される。レーザー照射プロセス中に化学結合剤の蒸発により、ポロシティが発生しやすい。

2.1.2 1ステッププロセス

1ステッププロセスでは、レーザー照射と同時に付加材料が供給される。付加材料は、パウダー状、ワイヤー状、またはペースト状の形態の何れかが用いられている。パウダー供給方式は、付加材料に遮られることなくレーザーが基板（母材）に照射されるため、ワイヤー供給方式やペースト供給方式と比較してロバスト性の高いプロセスとされている。

2.2 レーザークラディングとレーザーアロイングの特徴

基板（母材）表面上に材料を付加した際の典型的な断面を模式的に図 2-1 に示す。レーザー加熱により、基板（母材）も表層の一部が深さ d だけ溶融し、付加材料と合金を形成する（付加材料が母材により希釈される）。希釈率 P は、 $P = d / (h + d)$ で定義される。

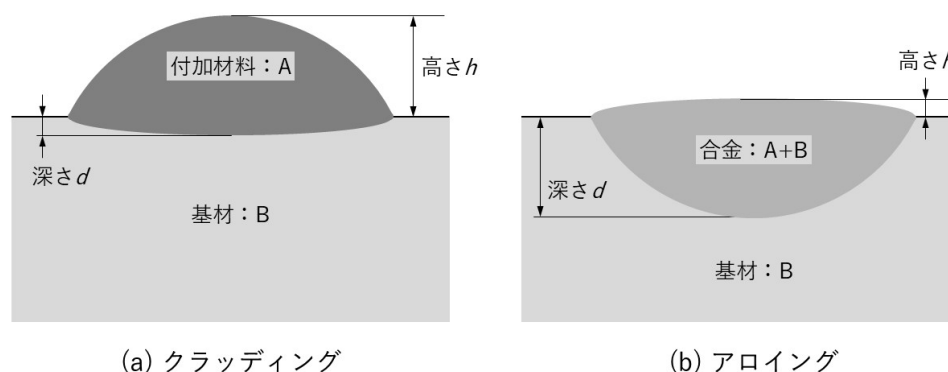


図 2-1 材料付加した際（クラディング・アロイング）の断面模式図

クラディングでは、 d を限りなく小さく（希釈を最小化する）ことが望ましいのに対して、アロイングでは、 h を限りなく小さく（希釈を最大化する）ことが望ましい²⁾。レーザーを用いた

クラッディングとアロイングは、どちらも基板（母材）表面にレーザーエネルギーで材料を付加するという意味で類似のプロセスであるが、生産技術的には正反対のプロセス制御を行う。

レーザークラッディングは材料への入熱が局所限定的となるため、従来熱源によるクラッディングと比較して希釈率と処理部品の熱変形を低減できることが特徴である。一方、レーザーアロイングは、極めて大きな凝固速度となるため、過飽和状態や非平衡状態の合金層を形成することも可能であることが特徴とされる³⁾。

参考文献

- 1) E. Toyserkani, A. Khajepour, S. F. Corbin, Laser Cladding, 1st Edition; CRC Press, Boca Raton, USA, pp.55-72, ISBN 0-8493-2172-7 (2005)
- 2) M.F. Schneider, Laser cladding with powder; Print Partners Ipskamp, Enschede, NL, pp.21-24, ISBN 90-365-1098-8 (1998)
- 3) 萩野秀樹, 山口拓人, レーザ焼入れおよびレーザ合金化, スマートプロセス学会誌, Vol.1, No.6, pp.262-267(2012)

第3章 機能付与を目的とした表面処理技術

3.1 プラント機器

高温環境下で長期間の高速回転稼働される蒸気タービンブレードは、耐エロージョン性を高める必要があり、レーザークラッディングにより、前縁部に Co-Cr-W 基合金層を形成している。

長期間にわたり、高温高压の蒸気と高温の燃焼ガスに晒されるボイラーチューブも、耐摩耗性と耐蝕性を付与する表面処理を必要とされる。従来、MIG (Metal Inert Gas) または PTA (Plasma Transferred Arc) を熱源としたクラッディングにより、耐摩耗・耐蝕合金層を形成してきた。従来熱源によるクラッディングでは、母材溶融による合金の希釈が大きく、所望の耐摩耗・耐蝕性が得られないという問題があった。この課題を解決する手段として、

- ① ボイラーチューブ母材表面に第一層として希釈の少ないレーザークラッディング層を形成する
- ② 第一層上に第二層として従来熱源 (MIG または PTA) を用いたクラッディング層を形成することにより、母材による合金層の希釈を低減するとともに、厚みのある耐摩耗・耐蝕性被膜を形成する方法が提案されている¹⁾。

3.2 輸送機器

自動車用エンジンのバルブは、吸排気のために高温環境下で高繰返し開閉を行う。互いに接触しあうエンジンバルブ・シリンダーブロックのバルブシートの双方には、その接触面に耐熱・耐摩耗性が要求される。エンジンバルブ側のシート接触面には、従来、パウダー供給方式による Co-Cr-W 基合金のレーザークラッディングが採用されており、量産技術として確立している²⁾。

一方、シリンダーブロックのバルブシート側については、従来、耐熱・耐摩耗合金製シートを圧入されてきた。自動車の小型軽量化、低燃費化という市場ニーズに対応して、エンジン・シリンダーブロックも鋳鉄製からアルミ製に移行する中、バルブシートを圧入から、シリンダーブロックに耐熱・耐摩耗性合金によるレーザークラッディングへの置換が行われた³⁾。

当初 (1990年代) は、CO₂レーザーを熱源とし、パウダー供給ノズルとシールドガスノズルが併用された。また光ファイバー伝送が困難なため、ワーク (エンジン・シリンダーブロック) を傾斜回転駆動させる生産システムが利用された。現在では、光ファイバー伝送可能な高出力半導体レーザーを光源とし、レーザーとパウダーを同軸で供給可能なヘッドを搭載したフレキシブル生産システムに置換され、ワークを固定し、レーザーヘッド側を駆動する方式となっている⁴⁾。

自動車に限らず、殆どの輸送機器には、減速・停止のための様々なブレーキシステムが搭載されている。ディスクブレーキの鋳鉄製ディスク摩耗面上に、耐摩耗性被膜をレーザークラッディング処理することにより、ブレーキシステム自体の制動能力の向上と耐摩耗性向上によるディスク薄肉化によるブレーキシステムの小型軽量化に資するとする提案がなされている⁵⁾。

3.3 電気接点

各種の電子回路において、電源や電気信号を容易に接続・遮断するためにコネクタが用いられ

る。コネクタには、接続端子がオス端子とメス端子があり、オス端子とメス端子の接点を接触させることで電氣的に接続される。接続端子となる母材金属板（一般的には Cu 合金が用いられる）をプレス成形加工した後、着脱時の摩耗・酸化等による通電不良を抑制するために、表面にはめっき等の表面処理が施される。

めっき材料としては、貴金属（Au や Ag）が用いられるが、Cu 合金への直接の電気部分めっきでは、密着性が得られにくいだけでなく、貴金属と Cu の標準電極電位差により、めっき膜ピンホール部から電蝕が発生する。これを防止するため、Cu 合金上に電気 Ni めっきを施し、下地 Cu 合金を露出させない対策がなされているが、工程が長く複雑となるとともに、コストアップとなる。相手端子と接触するように Cu 合金母材先端に加工された端子部と、母材根元の電線圧着部のみに Sn めっきを施し、端子接点にのみ、下地めっき無しに Au または Ag めっきを施す方法が提案されている⁶⁾。提案された方法では、Au のナノ粒子ペーストを端子接点に塗布し、CW レーザーをペースト塗布膜上に照射し焼結する。Au はレーザー光に対する反射率が高く、Au ナノ粒子ペーストにレーザー光を直接照射しても効率的にレーザー焼結できないとして、基板裏面側からレーザー加熱する方法も提案されている⁷⁾。

3.4 軸受け軌道面

軌道面と転動体が、点または線接触状態で荷重を支える軸受では、接触面から深さ数百 μm まで、せん断応力が生じる。このため、表面から深さ数百 μm 程度以上の領域まで、緻密な耐熱・耐摩耗層が必要となる。レーザークラディングにより、軌道面に Ni 基金属間化合物を硬質粒子として分散させる技術が開示されている⁸⁾。クラディング層は、Ni 基金属間化合物であり、硬質粒子を分散させることで形成される。

軸受け軌道面は、レーザークラディング処理後に、研磨仕上げが必要である。硬質粒子が分散した状態での研磨仕上げは困難であるとして、硬質粒子分散ではなく、急熱急冷効果による硬化を利用する技術も提案されている⁹⁾。

3.5 連続鑄造用鑄型

製鋼における連続鑄造法においては、精錬された溶鋼が連続鑄造用鑄型によって冷却され、鑄型との接触面から溶鋼が凝固し、さらに全体が冷却され、連続的に鑄片が生産される。鑄型は Cu 製であり、水冷機構を有している。鑄型内における冷却が不均一になると、鑄片への凝固過程における凝固層の形成が不均一となる。凝固層の収縮や変形に起因する応力が作用し、不均一度が大きい場合には、鑄片の縦割れ発生や次工程での表面割れなどの原因となる。

鑄型表面に多数の穴（凹部）を形成し、低熱伝導率金属やセラミックス等を埋め込むことにより、溶鋼の凝固時に発生する熱応力を周期的及び規則的に分散し、冷却鑄片の割れを抑制するだけでなく、連続鑄造鑄型の表面損傷も抑制することができる。その抑制効果を高めるために、穴形状、個数、配置についての検討や、穴に充填する金属などの熱伝導性の検討がなされている。

一方では、生産性向上の目的で、連続鑄造の高速化や、連続鑄造鑄型の長寿命化ニーズがある。

- ① Cu 鑄型の穴（凹部）に、Ni または Ni 合金めっき処理する。（第一層の形成）
- ② めっき層にレーザー照射し、Cu と Ni の合金層を形成する。（第一層の合金化）
- ③ 第一層上に厚い Ni 基合金層をレーザークラディング処理する。（第二層の形成）

により、連続鑄造鑄型の層間密着強度が高まり、鑄型表面凹部と銅鑄型との境界面に発生する大きな応力と、低熱伝導充填金属に蓄積する熱量に対する耐性が高まり、割れや剥離が生じにくい¹⁰⁾。

3.6 装飾的应用

ナノレベルのサイズを有する金属コロイドは、凝集体を形成することで様々な色を発することが知られている。金属コロイドを混入した液体状の塗料・染料・ガラス体を基材表面に塗布し、レーザー照射により、金属コロイドを凝集させ、所定の模様からなるカラーマーキングを行う方法が権利化された¹¹⁾。しかし、この方法では Au ナノ粒子に対して、3 原色の一つである黄色を発色することが出来ず、Au だけでは、フルカラーマーキングは実現できなかった。これに対して、Ag を用いると、

- ① 銀鏡反応・スパッタリング・蒸着の何れかの方法で基材表面に Ag 薄膜を生成（第 1 ステップ）
- ② Ag 薄膜にレーザー照射し、Ag を粒状化（第 2 ステップ）

により、Ag が発色する。レーザー照射条件により、Ag 粒子のサイズを制御することにより、黄・赤・青、または緑・赤・青の三原色を発色させることが可能であり、Ag ナノ粒子のみで、フルカラーマーキングを可能とする技術が提案されている¹²⁾。

希土類に属する六ホウ化ランタン (LaB_6) は、濃紫～青紫色を帯び、高硬度（約 Hv2500）と高い耐蝕性を有しており、高級腕時計の文字盤等の装飾に利用されている。金属基板上に堆積させた LaB_6 に、レーザー照射すると、その照射条件により、発色状態が変化することを利用して、装飾効果を高める方法が提案・実用化されている¹³⁾。一例として、パルス幅：4 ns、平均出力：8 - 10 W、パルスエネルギー：40 - 100 μJ 、繰返し周波数：100 - 200 kHz、スポット径：68 μm 、スポット・オーバーラップ率：70 - 85%、及び、フルエンス：1.2 - 2.8 J/cm^2 の照射条件において青色の発色が得られている¹³⁾。

3.7 硬質粒子分散レーザークラディングによる部品補強・長寿命化

硬質粒子を含む Ni 基または Co 基合金を、部品表面にレーザークラディングすることで、補強・長寿命化する方法が提案されている。硬質粒子としては、炭化タングステン (WC)、炭化チタン (TiC)、チタンナイトライド (TiN)、及びチタンカーボンナイトライド (TiCN) 等が利用される。

二輪車の盗難防止用固定器具の切断破壊対策として、鋼製の角棒表面に硬質粒子分散型レーザークラディングを施すことが提案されている¹⁴⁾。

食品加工で使用される材料押出しスクリーは、長時間の使用中に大きな摩擦抵抗を受けている。耐久性を高めるため、従来は WC 粒子を含む Ni 基合金を HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) 溶射（一般的には「高速フレイム溶射」と呼称される）していた。これをレーザークラディング

グに置換することにより、耐久被膜の密着性が向上し、溶射被膜に対して 300%長寿命（4000時間の連続使用可能）化したとの報告事例がある¹⁵⁾。

参考文献

- 1) 特開 2024-125477 ボイラーチューブの表面処理方法
- 2) 特許 1676788 自動車用エンジンバルブおよびその製造方法
- 3) 柴田公博, 自動車産業分野, レーザー研究, Vol.26, No.1, pp.11-13 (1998)
- 4) K. Yanaka, Laser cladding improves mass production of engine valve seats, Industrial Laser Solutions, Vol.34, No.4, pp.19-23 (2019)
- 5) 特表 2024-543857 特に動力車用の摩擦ブレーキ
- 6) 特開 2020-149769 貴金属めっき端子及びその製造方法
- 7) 特開 2010-043346 導電性パターンの形成方法及びめっき端子の製造方法
- 8) 特許 7219156 玉軸受及びその製造方法
- 9) 特開 2024-013914 転がり軸受の製造方法
- 10) 特許 7425944 連続鑄造用鑄型の製造方法
- 11) 特許 3851126 レーザカラーマーキング方法およびその装置
- 12) 特許 4487072 レーザカラーマーキング方法
- 13) 特許 6847297 装飾的な面の作製方法
- 14) 特表 2024-537984 固定デバイス
- 15) Laser cladding extends life of extrusion screws by 300%, Industrial Laser Solutions, Vol.32, No.1, p.2 (2017)

第4章 構造形成を目的とした表面処理技術

4.1 金属部品補修

航空機用ジェットエンジンは、エンジン動作中に消耗するため、定期的な検査と部品交換による安全を保障している。しかし、消耗部品を高価な新しい部品と交換することは、航空会社にとって大きな経営上の負担にもなるため、消耗部品を高品質・低コストで補修・再生できることが望ましい。新品部品との交換と比較してコストメリットがあり、且つ高信頼性を保証できる補修技術としてレーザークラディングが注目されている¹⁾。Ni 基耐熱合金（ハステロイ）や Ti 合金（Ti-6Al-4V）等が対象となる。

類似構造であるガスタービンエンジンでも、安定稼働を保証するために消耗部品の定期的な検査と部品交換を必要とするものがあり、従来は TIG (Tungsten Inert Gas) を熱源としたクラディング技術により、補修が行われていた。熱源を TIG からレーザーに置換することにより、

- ① 部品への入熱が抑制され、熱による耐熱・耐摩耗等の材料特性低下が抑制される
- ② 部品の熱変形が抑制される
- ③ クラディングの寸法・形状の精度が向上し、後加工（機械加工による仕上げ）の工数が低減される

というメリットがあるとの報告例がある²⁾。Co 基耐熱・耐蝕合金（L-605）製ガスタービンエンジン用各種部品のレーザークラディングによる補修に関する具体的な事例が公表されている³⁾。

風力発電用タービン部品にも、同様な補修ニーズがあり、レーザークラディングを適用した事例が公表されている⁴⁾。

鉄道車両用大型ディーゼルエンジンのシリンダボア内面（ピストンとの摺動面）の摩耗損傷修復に、レーザークラディングの使用報告例がある。穴径φ178 mm、深さ340 mm のボアに挿入・回転しながらレーザークラディングする特殊ヘッドにより、厚さ1 mm 以上のクラディングを形成している⁵⁾。

レーザークラディングによる部品補修では、母材表面上に複数のクラディングビードを重ね合せて造形する必要がある。隣接するクラディングビードの重なり部分での溶融不良は、クラディング層内での亀裂等の品質不良の原因となる。これを防止するために、重なり部分に照射されるレーザーのエネルギー分布を高める制御を行うことが提案されている⁶⁾。

4.2 付加製造

4.2.1 レーザークラディング技術を応用した付加製造の概要

付加製造（AM: Additive Manufacturing）の方式は、7つのカテゴリーに分類・体系化されている⁷⁾。金属材料の付加製造に利用されているのは材料押出（MEX）、粉末床溶融結合（PBF）、結合剤噴射（BJT）、シート積層（SHL）、指向性エネルギー堆積（DED）の5方式である。このうち、レーザーを熱源として使用する付加製造方式としては、粉末床溶融結合（PBF）と指向性エネルギー堆積（DED）の2方式に限定される。粉末床溶融結合（PBF）は、付加材料前置方式であり、

指向性エネルギー堆積（DED）は、パウダー供給方式のものとワイヤー供給方式のシステムがある。

金属材料の付加製造には、次のようなメリットがあるとされている。

- ① 従来工法では製造困難である高機能・超軽量な複雑形状実現
 - 金型やタービンプレードの内部に複雑な冷媒流路形成可能
 - 複雑なトラス構造、バイオミメティクスを応用した超軽量構造最適化可能
- ② 材料の歩留まり向上
 - ブロック状素材からの切削加工よりも歩留り向上し材料コスト低減可能
 - 難切削材料等の加工コスト低減（Ti 合金等）
- ③ 部品在庫、金型保管等のコスト低減
 - 生産終了した乗用車等の補給用部品在庫管理コスト低減
 - 追加製造のための金型保管コストを低減。
- ④ 輸送コスト低減とサプライチェーン短縮（現地調達化）
 - 損傷部品の補修・交換現地施工可能
 - 兵站（サプライチェーン）の負担低減

表 4-1 金属を造形対象とした AM 方式と代表的サプライヤー

方式	造形プロセス概要 代表的サプライヤー
材料押出（MEX） Material EXtrusion	金属粉末と熱可塑性のバインダー混合材料を積層造形後、焼結 Desktop Metal (https://www.desktopmetal.com/)（電気炉） Markforged (https://www.markforged.com/)（電気炉）
粉末床溶融結合（PBF） Powder Bed Fusion	金属粉末を敷いた領域を選択的にレーザーまたは電子ビームで加熱溶融結合 3D Systems SLM Solutions GE Additive (旧 Concept Laser （レーザー） 旧 Arcam （電子ビーム）)
結合剤噴射（BJT） Binder JeTting	金属粉末を敷いた領域を選択的に結合材噴射、加熱固化 ExOne (https://www.exone.com/)
シート積層（SHL） SHeet Lamination	金属箔の超音波接合・積層プロセスと CNC フライス加工の組合せ Fabrisonic (https://fabrisonic.com/)（超音波接合）
指向性エネルギー堆積 （DED） Directed Energy Deposition	金属粉末または金属ワイヤーを熱源（レーザー、電子ビーム、アーク）で加熱溶融して積層造形 OPTOMECH (https://optomech.com/)（レーザー） Sciaky (https://www.sciaky.com/)（電子ビーム）

4.2.2 実用部品への応用

金属を造形対象とする付加製造技術利用が最も進んでいるのは、航空宇宙防衛産業である。公表資料によれば、GE は2004年以来、ジェットエンジンの飛行重要保安部品製造への付加製造技術応用研究に着手している⁸⁾。2012年には Morris Technologies (MTI) と Rapid Quality Manufacturing (RQM) を買収、2016年には Arcam と Concept Laser を買収し、付加製造技術ユーザーとしての顔だけでなく、世界を代表する巨大な付加製造技術サプライヤーとしての顔も併せ持つ姿に変貌を遂げている。

航空宇宙防衛産業においては、実用部品の量産技術の一つとして、付加製造技術の適用を認証している⁹⁾。製造工程での利用が認証されている技術は、表4-1に示した7方式のうち、PBF（粉末床溶融結合）だけであり、熱源もレーザーと電子ビームに限定されている¹⁰⁾。

航空宇宙防衛産業において、PBF 方式金属 AM は、「特殊工程」、すなわち「製造およびサービス提供の過程で生じるアウトプットが、それ以降の審査及び測定で検証することが不可能な場合（製品が使用されサービスが提供された後でしか不具合が顕在化しない場合）の作業工程」の一つとして取り扱われ、「航空宇宙防衛産業における特殊工程管理認証プログラム」National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program（通称「NADCAP」）の管理対象として、特に厳格な品質の作り込みが求められている。

参考文献

- 1) M. H. Van Dijk, Repairing aero-engine parts, Industrial Laser Solutions, Vol.21, No.5, pp.26-27 (2006)
- 2) T. Peters, Laser cladding replaces TIG for industrial gas turbines, Industrial Laser Solutions, Vol.27, No.6, pp.14-16 (2012)
- 3) L. Xue, M. Donovan, Y. Li, J. Chen, S. Wang, G. Campbell, Laser repairing gas turbine engine components, Industrial Laser Solutions, Vol.29, No.3, pp.24-29 (2014)
- 4) R. Kaufold, Laser cladding technology helps manufacturers 'go green', Industrial Laser Solutions, Vol.33, No.2, pp.15-19 (2018)
- 5) S. Kalawrytinis, A. Weisheit, H. Desmecht, Laser cladding of worn cylinder bores, Industrial Laser Solutions, Vol.26, No.3, pp.22-26 (2011)
- 6) 特開 2024-060317 肉盛溶接方法、及び金属部材の補修方法
- 7) JIS B 9441:2020, 付加製造(AM)-用語及び基本的概念
- 8) T. Rockstroh et al., Additive Manufacturing at GE Aviation, Industrial Laser Solutions, Vol.28, No.6, pp.4-6 (2013)
- 9) AC7110, Nadcap Audit Criteria for Welding/Torch and Induction Brazing and Additive Manufacturing
- 10) AC7110/14, Nadcap Audit Criteria for Laser and Electron Beam Metallic Powder Bed Additive Manufacturing

第5章 質量増加（物質付加）を伴う表面処理のための機器・処理方法

5.1 機器

第3章3.2節に記述した通り、AI製自動車エンジン・シリンダヘッドのバルブシート部にはレーザークラディングによる耐熱・耐摩耗層が形成される。当初（1990年代）は、CO₂レーザーを熱源とし、パウダー供給ノズルとシールドガスノズルが併用され、ワーク（エンジン・シリンダブロック）を傾斜回転駆動させる生産システムが利用されたが、現在では光ファイバー伝送可能な高出力半導体レーザーを光源とし、レーザーとパウダーを同軸で供給可能なヘッドを搭載したフレキシブル生産システムに置換され、ワークを固定し、レーザーヘッド側を駆動する方式となっている¹⁾。

この技術革新に関連して、レーザーとパウダーの同軸供給ヘッドに関連した特許が出願され、権利化されたものもある²⁻⁴⁾。その後、この技術革新に触発され、他社からもレーザーとパウダーの同軸供給ヘッドに関わる特許出願がなされている⁵⁻¹⁰⁾。レーザーと付加材料を同軸供給する加工ヘッドの工夫・進化は、第4章4.2節に記述した付加製造技術、特に、指向性エネルギー堆積（DED）方式の技術革新と発展に繋がっている。

第3章3.2節に記述した AI 製自動車エンジン・シリンダヘッドのバルブシート部のレーザークラディングに関連して、レーザーとパウダーの同軸供給関連以外についても、特許出願がなされている。加工時にキャリアガスで加工点に供給される金属パウダーの一部と溶融金属（スパッタ）が加工点の周辺に飛散することがある。これらがクラディングビードのオーバーラップ部上に残置されると局所的な粉量過多となり未溶着不良が発生する。その対策として、レーザークラッド加工点よりも前方にスパッタ受機構（ヘッドに追従して加工方向に移動する受板）を配置し、加工点前方に飛散した金属パウダーやスパッタが溶融池に取り込まれることを防止している¹¹⁾。

ボイラー管のように、表面に湾曲部がある場合、光源から表面までの距離が不均一となる。そのため、表面のレーザー加熱温度も不均一となり、膜厚を均一にレーザークラディング施工することは困難であった。この問題を解決するために、

① レーザー出力工程

② レーザー分岐工程

レーザー光を複数に分岐・分散させ湾曲面に対してレーザーエネルギー分布を均一化

③ クラディング工程

湾曲面に対してクラディング用パウダー供給量を均一化

の3工程をとる方法が提案されている¹²⁾。

また、ワイヤー供給方式によるレーザークラディングの施工効率を高める方法として、ワイヤーフィーダーで通電加熱された予熱ワイヤーを供給するホットワイヤー・クラディングという技術が提案されている¹³⁾。ワイヤーの予熱には、アーク溶接用コンタクトチップ（ワイヤーに通電加熱）を転用できるとしている。

5.2 付加材料とその供給方法

付加材料の供給方法について、第2章2.1節に記述した通り、パウダー・ワイヤー・ペースト状で供給することが一般的とされているが、国内出願特許を調査した結果、それ以外にも様々な方法で付加材料を供給する方法が提案されている。

5.2.1 めっき技術の応用

電気めっき法では、金属イオンを含むめっき浴中に陽極（金属）と陰極（ワーク）とを浸漬・通電してめっき層を施し、その後洗浄・中和・乾燥処理する。複合めっき（上層に別の種類の金属めっきを施す）の場合には、別のめっき浴を準備して、上記と同様の工程を経ることとなり、

- ① 多種類のめっき浴が必要となり、且つその工程が煩雑となる。
- ② 通常のメッキ処理は低温処理であるため、処理に長時間を要する。
- ③ 複雑且つ凹凸の激しいワーク表面に均一膜厚のコーティングを行うことが困難。

という課題がある。種々のイオンを含むめっき浴を透明容器に入れ、めっき処理するワークを浸漬し、特定金属イオンのみが吸収しやすい波長のレーザー光を照射する可変波長レーザーにより、ガラス容器の外側からめっき浴を通して特定波長のレーザー光をワークに高温で選択的に照射しつつ複数種のめっき処理を行う方法が提案されている¹⁴⁾。

自動車用ロータリー型コンプレッサーは、軽量化のために Al 合金製である。Al 同士の摺動となるため、無電解 Ni-P めっきが施されている。無電解 Ni-P めっきは、熱処理（約300℃）することにより硬化し、耐摩耗性が改善することが知られている。しかし、母材が Al 合金の場合、高い熱処理温度では材料強度が低下するため、熱処理温度に限界があり、実質的に Hv500～600程度の硬度をもつ皮膜しか得られない。これに対して、Al 合金からなる素材の摺動面に形成された無電解 Ni-P めっき皮膜（P 含有量 0.1～5wt%）にレーザー照射することにより、Al 母材強度を低下させることなく、Hv800以上の高耐摩耗性被膜を得る方法が権利化されていて、Al 合金母材上に施された無電解 Ni-P めっき被膜（P 含有量 3.0wt%）の場合に、レーザー照射により Hv620から Hv870に硬化する実験結果が示されている¹⁵⁾。また、Al 合金同様に鋼材を母材とする無電解 Ni-P めっきにおいても、レーザー照射によるめっき被膜硬化による耐摩耗性・耐久性を向上させることが権利化されている¹⁶⁾。

以上のように、従来、めっき被膜に対するレーザー照射は、「熱処理」の一種として認識されているが、めっきによる付加材料前置と捉えることができる。

5.2.2 溶射技術の応用

軽水炉圧力容器境界部のようなγ系ステンレス鋼溶接部では、その溶接熱影響部において結晶粒界に Cr 炭化物が析出し、粒界近傍の Cr 欠乏層の形成が応力腐食割れの原因となり得る（鋭敏化）。鋭敏化した組織にレーザー照射することにより、粒界析出した Cr 炭化物を、結晶中に再固溶することが行われている（脱鋭敏化）。30～40年の稼働期間が想定される軽水炉プラントにおいては、約288℃の高温高圧水に接する部材は、溶接熱影響部等の脱鋭敏化のためのレーザー照射を

施した後も、尚、288℃で40年以上にさらされ続けるため低温鋭敏化についても十分な配慮が必要である。そこで、

- ① γ 系ステンレス等の Fe-Ni 基合金からなる原子力プラント部材表面に高耐食性合金を低温溶射する
- ② その後、レーザー照射して表面部を溶融させ、セル間隔が0.2～2.0 μm の範囲にあるセル組織を持つ溶融凝固層を形成する

の2工程を経ることにより、低温鋭敏化による応力腐食割れ対策を行う方法が提案されている¹⁷⁾。

耐熱・耐蝕・耐摩耗性合金を用いた被覆処理方法として、溶射が広く採用されている。溶射皮膜は一般的に多孔質で、特に皮膜表面から素材（母材）に達する貫通孔が存在するため、腐食性成分が素材に浸透することにより、素材自体については十分な耐熱・耐食・耐摩耗性が得られない場合がある。溶射皮膜にレーザー照射して溶融・再凝固させる際、

- ① 700～1000℃の昇温範囲における加熱速度が20℃/s 以上
- ② 800～500℃の降温範囲における冷却速度が40℃/s 以上

とすることにより、溶射皮膜形成素材の耐熱・耐蝕・耐摩耗性・硬度を向上させる技術が権利化されている¹⁸⁾。

基材に形成した溶射皮膜表面にレーザー照射し、溶融・再凝固させて、緻密化することにより、耐熱・耐蝕・耐摩耗性等の特性改善が行われている。レーザー照射による緻密化処理の際に、表層の凝固収縮によりクラックの発生を伴うことがある。厚い溶射被膜層の緻密化を目的として、レーザー出力を上げたり、走査速度を遅くしたりすると、入熱過多となって、溶射被膜を貫通するほどの大きなクラックが発生し、溶射被膜の特性が損なわれるリスクを伴う。被照射領域に、先行レーザービームと追従レーザービームとを重ねて照射し、加熱冷却の温度変化を緩やかにすることにより、レーザー照射部に過大なクラックの発生を抑制できる。緻密化層を深部にまで到達させ易く、緻密化することの十分な効果が得られる。レーザービームの走査速度を小さくする必要がなく、処理時間が延びることによるコストアップを招かない工法となる¹⁹⁾。

溶射法を用いたコーティング技術の課題として、母材と溶射皮膜の密着性と、母材による溶射被膜の希釈がある。

- ① 金属・合金・サーメットからなる基材上に、基材と異なる材料からなる溶射皮膜を形成
- ② 溶射皮膜表面にレーザー照射し、溶融・再凝固により、改質層を緻密化するとともに、母材との界面に合金化層を形成
- ③ ②で更に改質層上に、溶射皮膜を形成
- ④ ③で形成した溶射皮膜表面にレーザー照射し、溶射皮膜と直前に形成した改質層の一部を溶融・再凝固させて、緻密化された改質層を形成

という工程を繰り返すことにより、厚い溶射被膜を形成できるとともに、母材との密着性、母材による希釈の課題を解決できる工法が権利化されている²⁰⁾。

5.2.3 雰囲気ガスの応用

比強度が高く、また耐蝕性にも優れている Ti 系材料は、耐摩耗性に劣るという欠点があり、摺動部や接触部には表面硬化処理が必要である。従来、Cr 等の湿式メッキ・CVD・PVD・イオン注入等の多様な表面処理が採用されているが、初期投資を含めたコスト・熟練作業者の確保等の問題がある。より簡便なガス窒化法も提案、一部採用されているが、高温での加熱・保持（例えば 850℃で10～20時間）が必要となり、処理コストが高く、また所望個所のみの部分硬化も困難である。N₂ガス雰囲気下で、Ti 系材料表面にレーザー照射により、照射部分及び近傍のみを選択的に TiN を形成する方法が提案されている²¹⁾。

金属表面の所定の領域だけに選択的にめっき処理を行う為には、マスキング剤塗布・脱脂・酸化膜除去という前処理が必要である。めっき処理を必要とする部分のみに、N₂雰囲気化で選択的にレーザー照射することにより、照射部のみに窒化膜を形成する。これにより、脱脂・酸化膜除去を必要とせず、窒化膜形成個所だけの選択的めっき処理を実現している²²⁾。

5.2.4 PLD の応用

Ag や Cu などからなる金属物品は、大気中の腐食性ガスにより表面が変色し、美観が損なわれ、貨幣の場合には流通上で問題となる。PLD (Pulsed Laser Deposition) 技術により、Ag や Cu 硬貨表面に厚さ10～2000 Å の TiO₂膜を形成することにより、変色を防止する方法が提案されている²³⁾。

5.2.5 レーザークラッピング用合金開発

第3章3.2節に記述した Al 製自動車エンジン・シリンダヘッドのバルブシート部のレーザークラッピングに特化した合金の開発例について調査した。

内燃機関の高効率化にともない、燃焼温度が上昇しており、シリンダヘッド・バルブシート部も高温での耐摩耗性が要求される。母材 (Al) と過度に反応せず (希釈を抑制)、且つ高熱伝導率である Cu 合金を基材として、耐摩耗性を高めるための硬質粒子が分散されるクラッピング用合金パウダーの開発が必要となった。このような状況で、耐摩耗 Cu 合金をクラッピングすることにより、Cu 合金本来の高熱伝導性に加えて、基材への放熱性を高め、冷却能を向上させることが望まれている。Ni+Co: 40.0wt%以下、Si: 3.0～8.0wt%、Fe: 30.0wt%以下、Cr: 10.0wt%以下、Mo+W: 20.0wt%以上を含有する硬質パウダーと、Cu パウダーの混合(硬質パウダー含有量: 3.0～50.0wt%)により、冷却能に優れるとともに、高温かつ無潤滑環境でのすべり摩耗、凝着摩耗などに対して優れた耐摩耗性を発揮できる^{24, 25)}。

Al 製エンジンプロック・シリンダヘッドのバルブシート用レーザークラッピング合金に関して、硬質粒子分散による耐摩耗性確保とは異なり、より材料コストの安い金属 (Fe) を利用しようとする合金設計思想に基づいた事例がある。Fe: 15～85wt%, C: 0.02～2.0wt%, Cr: 4～30wt%と残部 Cu とする混合パウダーを使用したレーザークラッピングにおいては、

- ① 熔融状態で Fe リッチ相と Cu リッチ相に二相分離

② Cu リッチ相が下部(Al 母材側)に偏析、Fe リッチ相が上部(接触面側)に偏析する。このことにより、Al-Fe の金属間化合物を生成せず、シート面の耐摩耗性を Fe リッチ相で確保するクラッディングとなる²⁶⁾。

5.3 プロセス制御

パウダー供給によるレーザークラッディングでは、被加工物上にパウダーが到達するタイミングに合わせてレーザーを照射する必要があるが、パウダーの粒度分布偏析などで到達タイミングが変化し、品質不良を生じる場合がある。供給装置から吐出されたパウダーを光学的に検知しようとする、クラッディング部位に近接しており、被加工物と干渉し、あるいは、反射光・ヒューム・スパッタ等の影響を受けてしまう。このような課題を解決するため、パウダー供給装置から吐出される前に、供給装置内でパウダーの通過を検知し、クラッディング部位到達タイミングを予測する方法が提案されている²⁷⁾。レーザークラッディング装置は、

- ① クラッディング部位にパウダーを供給する手段
 - ② クラッディング部位にレーザーを照射する手段
 - ③ パウダーが供給手段から吐出される前に、供給手段を通過しているパウダーを検出することで、パウダーがクラッディング部位に到達するタイミングを測定する手段
 - ④ 測定手段の測定結果に基づいてレーザーの照射タイミングを制御する手段
- を備える。

クラッディング層を形成する場合、パウダーの状態が品質に与える影響が大きいため、パウダーを購入する際に一定の規格を設け、規格内のパウダーのみを使用しているが、規格内であってもパウダーの状態に応じて、クラッディング層の品質に、ばらつきが生じる。クラッディング装置は、施工前に、以下の予備ステップを実行することが提案されている²⁸⁾。

① パウダー表面の形状を推定するステップ

パウダーの色調・パウダーに含有する酸素量に基づいてパウダー表面の凹凸度合を推定する。

② パウダー表面の形状に基づいて、レーザーの照射開始タイミングを調整するステップ

パウダーの凹凸度合からレーザーエネルギー吸収度合を推定して、レーザー照射パターンまたはパウダーの供給パターンを調整する。

レーザー照射ノズルとパウダー供給ノズルが同軸にないクラッディング装置では、両者の供給タイミングの同期と、位置合せが重要である。クラッディング装置は、以下の手段を有することが提案されている²⁹⁾。

① パウダーを供給する手段

② パウダーがクラッディング部位に到達するタイミングを測定する手段

クラッディング部位へのパウダー到達タイミングを基準値として記憶する手段と、測定結果を比較する手段を有する

③ パウダー到達タイミング測定と基準値との比較結果に基づいて、レーザー照射に対するパ

ウダー供給開始タイミングを決定する手段

また、光電センサーを用いてパウダー吐出量と光電センサーの信号値の関係を把握しておき、光電センサーの信号をモニタリングすることで、レーザー照射のタイミングを調整する提案もなされている³⁰⁾。

参考文献

- 1) K. Yanaka, Laser cladding improves mass production of engine valve seats, Industrial Laser Solutions, Vol.34, No.4, pp.19-23 (2019)
- 2) 特許 4299157 粉末金属肉盛ノズル
- 3) 特開 2017-077578 レーザ肉盛方法
- 4) 特許 6729461 肉盛層の製造方法及びその製造装置
- 5) 特開 H09-141467 レーザ肉盛り装置
- 6) 特許 6412049 金属粉を供給しながらレーザーを照射する加工部を移動させて積層造形を行う積層造形加工方法及び積層造形加工装置
- 7) 特開 2023-115477 肉盛り加工装置および肉盛り加工方法
- 8) 特開 2023-129968 肉盛り加工装置および肉盛り加工方法
- 9) 特開 2024-021965 レーザ加工ノズル
- 10) 特開 2024-111785 肉盛加工ノズル
- 11) 特開 2023-182029 レーザクラッド加工方法
- 12) 特開 2023-183135 コーティング方法及びコーティング装置
- 13) 特開 2016-128190 ホットワイヤレーザークラディング法及びそれに用いる材料
- 14) 特許 2713638 特開 H04-026791 複合レーザーめっき方法
- 15) 特許 3066798 特開 H10-096084 摺動部材の表面処理方法
- 16) 特許 7232452 特開 2020-037718 めっき被膜の表面改質方法及び装置
- 17) 特許 3042072 特開 H05-078812 表面改質処理方法
- 18) 特許 4862125 特開 2007-154261 溶射皮膜を形成した素材の改質方法
- 19) 特許 5670862 特開 2013-95974 溶射皮膜における緻密化層の形成方法
- 20) 特許 6542367 表面改質部材の製造方法
- 21) 特開 H10-072656 チタン系材料の表面硬化方法
- 22) 特許 4861785 特開 2008-081783 大気中の前処理を伴っためっき方法並びにめっき前処理装置
- 23) 特開 2000-109990 耐表面変色性物品およびその製造方法
- 24) 田中浩司, 斎藤卓, 志村好男, 森和彦, 河崎稔, レーザ肉盛り用バルブシート合金の開発, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.28, No.3, pp.35-45 (1993)
- 25) 特開 2001-105177 肉盛り用粉末
- 26) 特開 2007-064009 内燃機関用シリンダヘッド、シリンダヘッドへのバルブシートの肉盛方法

- 27) 特開 2023-000238 レーザ加工装置およびレーザ加工方法
- 28) 特開 2023-012674 肉盛層の形成方法、形成装置及び形成プログラム
- 29) 特許 4026421 特開 2004-17109 金属粉末供給開始タイミング決定装置およびその方法
- 30) 特開 2022-130770 肉盛層の形成方法

6章 結言

表面処理技術調査 3 年目となる令和 6 年度は、質量の増加(物質付加)を伴うプロセスに関する調査を実施した。研究開発・実用化動向を探る手段として、関わる技術領域での公開特許情報をベースとし、付随・関連する各社広報資料・学会発表資料等も参考情報とした。令和 6 年度はレーザーによる表面処理技術に関する 407 件の特許明細書を調査対象とした。質量の増加を伴う表面処理技術としては、レーザークラッドリング（肉盛り）とレーザーアロイング（合金化）が代表的である。この両者は、ワイヤーまたはパウダー状等の付加材料を母材上に供給しながらレーザーを照射し、付加加工を行うという点では、同一の技術である。

第 2 章では、質量の増加を伴う表面処理プロセスの概要とレーザークラッドリングとレーザーアロイングの特徴をまとめた。質量増加（物質付加）を伴う表面処理の応用領域、対象材料も多岐に亘っているため、応用領域をカテゴリーに分類して、これまでの技術開発・実用化に向けた取組みの調査結果を、第 3 章と第 4 章にまとめた。第 3 章では、耐食性・耐摩耗性等の機能付与を目的とした表面処理技術を対象とした調査結果をまとめた。自動車産業（エンジン・バルブシート）・重工業産業（タービン）等を中心に量産技術として普及していることが判明した。第 4 章では、補修等の構造形成を目的とした表面処理技術を対象とした調査結果をまとめた。この技術がベースとなって、金属材料の AM(付加製造)技術に発展している。近年（2020 年以降）、金属材料 AM（付加製造）の基盤となっている。レーザー肉盛り技術に関連する特許出願が増加傾向にある。第 5 章では、質量増加(物質付加)を伴う表面処理のための機器・処理方法に関する調査結果をまとめた。AM 技術への応用進展に伴い、レーザー照射と付加材料供給を同軸で行える技術が普及しつつある。

金属材料を対象とした表面改質工程では、付加材料をワイヤーまたはパウダー状で供給しつつ、レーザー照射して表面上に合金層や肉盛り層を形成することが、従来から行われてきた。出願特許調査の結果、このような方法以外にも、メッキや溶射等の方法で材料を付加する方法に関するものが多くあることが判明した。今後、メッキ、溶射とレーザーとの複合加工としての技術体系化も想定し得る。

公益財団法人 光科学技術研究振興財団
委託研究報告書(令和 6 年度)

レーザー科学技術の将来に関する調査研究
－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と
将来に関する調査－ 3. 付加プロセス

令和 7 年 3 月

光産業創成大学院大学
〒431-1202 静岡県浜松市中央区呉松町 1955 番 1
TEL: 053-484-2501 <https://www.gpi.ac.jp/>

(禁無断転載)
